

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14525

研究課題名(和文) 磁場ベクトル分布測定のためのリアルタイム偏波制御型マイクロ波反射計測手法の実証

研究課題名(英文) Verification of real-time polarization-controlled microwave reflectometry for magnetic field vector profile measurement

研究代表者

井 通暁 (INOMOTO, Michiaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00324799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマ内部の磁場分布を測定することを目的とした偏波制御型マイクロ波反射計を提案し、その要素研究として、(1)プラズマ中での電磁波伝搬を評価するための全波計算コードの開発と一次元/二次元モデルにおけるモード変換量の定量評価、(2)偏波角のリアルタイム制御を実現する振幅・位相制御部の製作および性能評価、(3)改良型コーシー条件面法を用いた渦電流存在下での高精度最外殻磁気面推定の実現を達成し、提案手法を実現するための方策を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：A novel polarization-controlled microwave reflectometry was proposed to measure the internal magnetic field profiles of fusion core plasmas. A full wave calculation code was developed and quantitative assessment for mode conversion was carried out on one- and two-dimensional geometries. The control part to rotate the polarization angle was fabricated using variable gain amplifiers and phase shifters. The amplitude of two input waves for a dual polarized antenna was quickly changed within 4 micro seconds, resulting in a control frequency of up to 100 kHz. In order to adjust the polarization angle with the magnetic field on the plasma surface, the modified Cauchy Condition Surface method was employed to reconstruct the last closed flux surface with high accuracy while large eddy current was induced on the vessel wall. These results showed high feasibility for the proposed polarization-controlled microwave reflectometry.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：プラズマ計測 核融合 マイクロ波反射計

1. 研究開始当初の背景

核融合炉心プラズマの制御のためには内部磁場分布の情報が不可欠である。国際熱核融合実験炉 ITER や幅広いアプローチとしての JT-60SA 装置の建設が進捗している現在、核融合プラズマの内部磁場分布測定法として実用化されているものは、中性粒子ビーム由来の高速イオン発光スペクトルに現れるシュタルク効果を計測する動的シュタルク分光法、ファラデー回転やコットンムートン効果を原理とするレーザー偏光計等があるが、いずれも将来の原型炉~商用炉での運用には多くの課題が存在しており、代替手段の開発が必須と考えられる。

2. 研究の目的

現在使用されている動的シュタルク分光法では、プラズマへの中性粒子ビーム入射のための大面積真空ポートが必要なため、高いトリチウム増殖率が要求される原型炉での使用が困難であることに加えて、計測機器の大型・複雑化に伴う高コスト、メンテナンスの煩雑さ、さらには多次元計測への拡張が困難であるという欠点を有している。レーザー偏光計は比較的コンパクトであるが、多次元化に難点がある。

そこで本研究では、入射波の偏波面を高速制御可能なマイクロ波反射計を用いて、プラズマ内部の磁場分布を測定することを提案する。従来の反射計としては、背景磁場に平行な偏波をもつ正常波(O波)及び垂直な偏波をもつ異常波(X波)を用いた密度・磁場強度計測が用いられていたが、提案手法では、X-O線形モード変換率を測定することによって磁力線の空間シアを計測しようとするものである。

プラズマ端部でマイクロ波がX波として入射(すなわち、x方向に伝搬するマイクロ波の偏波方向とプラズマ端の磁場方向が直交)し、プラズマ中で磁場の方向θが空間的に変化する場合のX-Oモード変換率は線形近似の下で

$$\left| \frac{E_O}{E_X} \right| = \left| \int_0^x dx' \left| \frac{k_X}{k_O} \right|^{1/2} \frac{d\theta}{dx} \exp i \left( \int_0^{x'} dx'' (k_X - k_O) \right) \right|$$

と表される。すなわち、O波反射計によるO波の波数(k<sub>O</sub>)分布計測、X波反射計によるX波の波数(k<sub>X</sub>)分布計測、さらにはX-Oモード変換率分布を計測することによってプラズマ内部の磁気シア分布を推定することが可能となる。本研究では、プラズマ放電中にリアルタイムで入射波の偏波制御を行うことで、これら一連の測定を単一セットの送信-受信アンテナによって実現し、高精度化と小型・低コスト化の両立を図る。

本提案手法であるリアルタイム偏波制御型マイクロ波反射計は、計測ポートの大きさ

がマイクロ波アンテナ開口サイズ程度と非常に小型である上に、低コストかつ多次元分布計測への拡張が容易であるという面で本質的な優位性を有しており、従来法の課題を克服できると期待される。

3. 研究の方法

本研究では、プラズマ中の波動伝搬計算による提案手法の妥当性の検証、偏波面の高速制御が可能な反射計システムの構築、偏波制御型反射計で必要となるプラズマ表面の磁場ベクトル推定手法の確立、の3つの内容を取り扱った。プラズマとしては、東京大学の実験装置 UTST において形成される球状トカマクを対象としている。以下それぞれの方法について述べる。

(1) プラズマ中の波動伝搬計算においては、以下に示す Collisional Cold Plasma 近似の誘電率テンソルの表式を用いた全波計算を実施した。

$$\epsilon = \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}$$

$$S = \frac{1}{2}(R+L), \quad D = \frac{1}{2}(R-L), \quad P = 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_0)}$$

$$R = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_0 - \omega_{ce})}, \quad L = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_0 + \omega_{ce})}$$

$\omega_{pe}$ 、 $\omega_{ce}$ 、 $\nu_0$  はそれぞれ電子プラズマ周波数、電子サイクロトロン周波数、電子衝突周波数を表す。計算領域としては、疑似的な二次元および二次元を採用し、与えられたプラズマ内部の磁場・密度分布に対する伝搬およびモード変換を評価した。

(2) 本研究で開発対象とする偏波制御型反射計システムの概要を図1に示す。

偏波制御型反射計概要

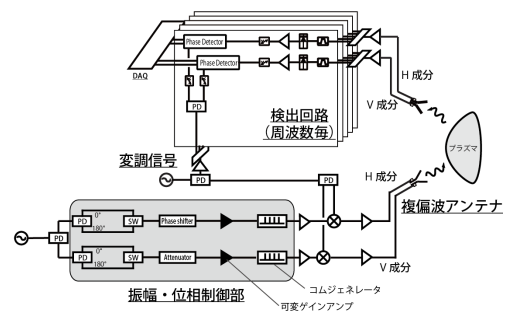


図1 偏波制御型反射計の概要

AM変調型マイクロ波反射計を拡張し、直交する二偏波成分を独立に入射および検出することによって、O波反射計、X波反射計およびモード変換量測定を実現するものである。このような計測システムにおいて、最も重要な開発要素は図左下の「振幅・位相制御部」である。プラズマに対して任意の偏波角を有する直線偏波のマイクロ波を入射するためには、アンテナ入力となる二偏波成分の

位相を使用する周波数のそれぞれにおいて揃えながら、振幅を高速制御する必要がある。本研究では、2 GHz の信号を二系統に分割した後に位相・振幅制御を行った上で、コムジェネレータに入力して 20 – 40 GHz 帯の二系統入力波を生成することを目的とし、制御部の構築ならびに性能試験を行った。

(3) 偏波制御型マイクロ波反射計を運用する際には、装置壁上に設置したセンサー信号に基づいて最外殻磁気面（プラズマ境界）における磁場の方向を精度良く推定する必要がある。対象とする UTST 装置では、初期球状トカマクプラズマを装置上下の二か所で誘導的に立ち上げた上で、軸方向合体法によって生成しているため、装置壁に流れる渦電流を正確に考慮する必要がある。そこで、プラズマ内部の電流の寄与と装置壁の渦電流の寄与を同一の境界積分方程式上で扱うことのできる改良型コーシー条件面法を採用し、最外殻磁気面再構成法の検討を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 対象とするプラズマパラメータ領域における X→O モード変換率を近似式および全波計算によって求めた結果を図 2 に示す。

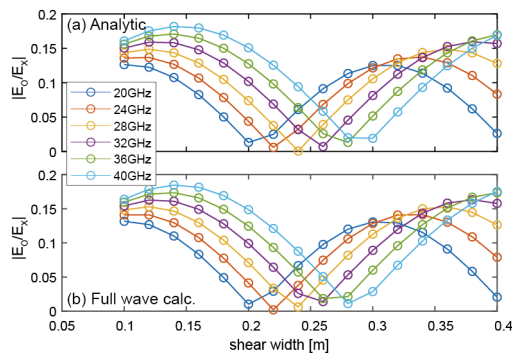


図 2 モード変換近似式と一次元全波計算結果との比較

横軸はプラズマ中での磁気シア領域の幅を表しており、入射波は磁気シア領域を通過したのち真空領域へと透過しているものとし、(a)は近似式による解析結果、(b)は全波計算結果を示している。UTST 装置において使用予定の 20 – 40 GHz のマイクロ波に対し、両者は一致した傾向を示しており、平面波近似の範囲内で近似式が有効であることがわかる。

一方、入射波が空間的な広がりを有している場合には平面波近似を適用することはできず、全波計算による正確な評価が必要となる。図 3 に、二次元領域に左方から入射した gaussian ビーム状の X 波の伝搬の様子を示す。磁場は空間的に一様（シアなし）、密度は  $x = 0.2$  m の位置で X 波のカットオフ密度の 0.9 倍となるように一次関数として与えて

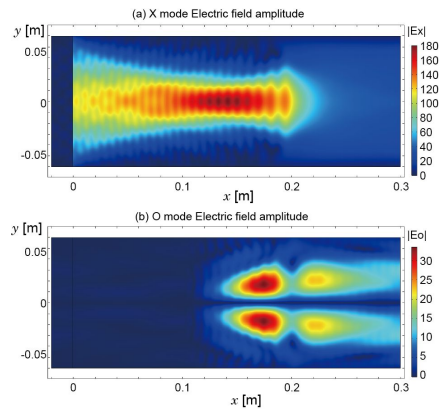


図 3 二次元モデルにおける X 波入射時の伝搬（磁気シアなし）

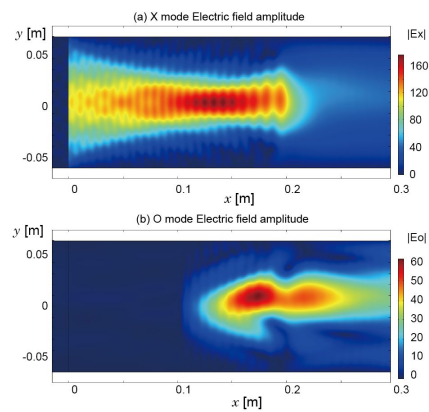


図 4 二次元モデルにおける X 波入射時の伝搬（磁気シアあり）

おり、(a)は X 波成分の、(b)は O 波成分の電場強度分布を示している。磁気シアが存在しないにも関わらず、 $y = 0$  の領域では X 波の波面が平面でなくなるため、位置によって波数ベクトルが  $x$  方向からずれ、電磁波の感じる屈折率が変化することによって O 波成分が現れていると考えられる。これは磁気シアによる線形モード変換とは異なる機構によるものであるが、元々の X 波成分の 20% 程度の強度を有しており、反射計構築の際には慎重な取り扱いを必要とする。

このような二次元モデルにおいて、さらに磁気シアが存在することによって O 波へのモード変換が発生する。図 4 に、5.5 rad/m の磁気シア存在下での (a) X 波および (b) O 波成分の電場強度分布を示す。 $y = 0$  の軸上でも線形モード変換によって O 波成分が生成されていることがわかる。さらに、 $y = 0$  において発生する O 波成分についても、空間構造が大きく変化していることがわかる。これは、入射波の空間構造に由来して発生する O 波成分は、 $y > 0$  の領域と  $y < 0$  の領域とで逆相になっていることに起因している。以上の結果から、入射アンテナプラズマ検出アンテナを結ぶ直線経路で発生する O 波は

磁気シアによるモード変換と考えられるが、アンテナが有限の大きさを有するために波面の広がりによって生じる 0 波成分が検出成分に含まれることとなり、計算結果を利用して適切に補正する必要があることがわかった。

(2) 図 5 に、プラズマに入射する高周波信号を生成するために用いるコムジェネレータの特性を評価した結果を示す。(a) の出力スペクトルに現れている 2 GHz おきの高調波のうち、偏波角を変化させた場合の二系統の 10 GHz 成分間の位相差を (b) に示す。

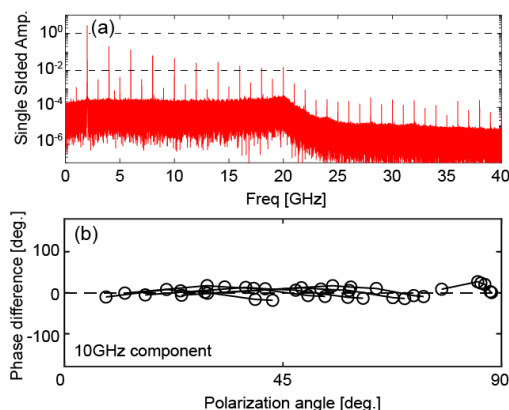


図 5 (a) コムジェネレータの出力スペクトルおよび (b) 二系統の出力間の位相差

アンプを内蔵したコムジェネレータは、大振幅の高調波成分を発生することができる反面、入力振幅変化に対する応答が非線形的となり、二系統の位相差が大きく変化してしまう。そこで本研究ではアンプを内蔵しないコムジェネレータを用いることで、位相差を生じさせることなく偏波角を変化可能であることを確認した。

一方、偏波角は二系統のコムジェネレータへの入力振幅比で決定されるため、高速でゲインを変化させることのできるアンプを新たに作成し、その特性を評価した。図 6 に、アンプの制御電圧を  $t = 0$  でステップ状に変化させた場合の (a) 出力振幅および (b) 出力位相の過渡応答特性を示す。それぞれの曲線は異なった出力振幅間の遷移を表している。制御電圧変更後  $4 \mu\text{s}$  以内に最終的な振幅値に収束していることから、対象としているプラズマにおいて必要と考えられる  $10 \mu\text{s}$  の制御周期を実現できると考えられる。ただし、出力振幅の変更にともなって (b) に示すように出力位相も変化してしまうことから、可変ゲインアンプによる振幅制御の前段に位相制御部を追加する必要があることが分かった。位相制御に用いるフェイズシフターおよびスイッチはいずれも  $2 \mu\text{s}$  以内での制御が可能であることから、二系統のコムジェネレータ出力の位相を保持しながら偏波角を 100

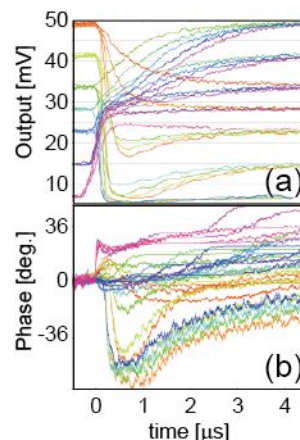


図 6 可変ゲインアンプの出力電圧および位相の過渡応答

kHz で変化させるシステムが実現可能であると結論づけられる。

(3) 改良型コーシー条件面法による最外殻磁気面推定結果を図 7 に示す。UTST 装置における球状トカマク合体生成過程の中でも、特に推定が困難と考えられる合体中の過渡状態について、数値解に基づく再構成を行った結果、センサー信号にノイズを重畳させた場合でも良好な最外殻磁気面推定が実現された。プラズマ電流値としては約 2% 以下の誤差で推定できており、偏波制御型反射計に必要な最外殻磁気面のピッチ角を良好な精度で取得することができる。

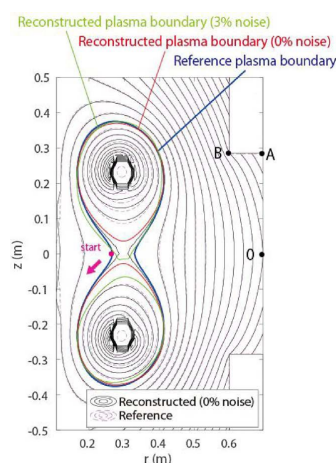


図 7 可変ゲインアンプの出力電圧および位相の過渡応答

以上、本研究では偏波制御型マイクロ波反射計の開発として、(1) 全波計算コードの開発と一次元/二次元モデルにおいて発生する 0 波成分の定量評価、(2) 偏波角のリアルタイム制御を実現する振幅・位相制御部の製作および性能評価、(3) 改良型コーシー条件面法による最外殻磁気面推定、を実施し、各要素について提案手法を実現するための方策を得ることができた。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

S. Kamio, M. Inomoto, K. Yamasaki, T. Yamada, C. Z. Cheng, and Y. Ono, "Magnetic island dynamics in magnetic reconnection in UTST experiments", *Physics of Plasmas*, 査読有, 25, 2018. 012126.

DOI: 10.1063/1.5006092

T. Ushiki, M. Inomoto, M. Itagaki, "Reconstruction of plasma shape and eddy current profile based on modified cauchy condition surface method in merging spherical tokamak", *Fusion Engineering and Design*, 査読有, 122, 2017, pp. 35-41.

DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.012

K. Kondo, M. Inomoto, X. Guo, T. Ushiki, T. Sugawara, T. Mihara, S. Kamio, H. Tanabe, Y. Ono, "Separated Double-Current Layers in a High-Guide-Field Reconnection Experiment", *Plasma and Fusion Research*, 査読有, 12, 2017, 1202033.

DOI: 10.1585/pfr.12.1202033

### 〔学会発表〕(計7件)

南佑典、井通暁、徳沢季彦、河森栄一郎、笠原寛史、辻村亨、偏波制御型マイクロ波反射計による磁気シア分布測定法の開発、*Plasma Conference 2017*, 2017.

T. Ushiki, M. Inomoto, M. Itagaki, S. McNamara, "Plasma shape reconstruction for merging spherical tokamak based on modified CCS method", 59<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Physics Society, Division of Plasma Physics, 2017.

T. Ushiki, M. Inomoto, M. Itagaki, S. McNamara, "Plasma shape reconstruction of merging spherical tokamak in UTST device", 19<sup>th</sup> International Spherical Torus Workshop, 2017.

M. Inomoto, K. Yamasaki, T. Ushiki, X. Guo, S. Kamio, R. Yanai, T. Sugawara, Y. Fukai, H. Yamanaka, R. Tamura, "Formation of Closed Flux Surfaces in Reconnection Current Layer by Accelerated Electrons during Merging Start-up of Spherical Tokamak", 26<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, 2016.

牛木知彦、板垣正文、井通暁、UTST 合体プラズマにおける CCS 法を用いたプラズマ位置形状および渦電流分布再構成、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、2016.

井通暁、牛木知彦、郭、山田琢磨、神尾

修治、山崎広太郎、菅原拓路、深井優介、山中晴揮、田村峻、田辺博士、小野靖、プラズマ合体を用いた球状トカマクの立ち上げと加熱、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、2016.

深井優介、牛木知彦、菅原拓路、郭学瀚、井通暁、UTST 球状トカマク合体実験における中性粒子ビーム入射(NBI)追加熱の検証、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、2016.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

井 通暁 (INOMOTO, Michiaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00324799

### (3)連携研究者

徳沢 季彦 (TOKUZAWA, Tokihiko)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90311208

### (4)研究協力者

河森 栄一郎 (KAWAMORI, Eiichirou)